

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11493

研究課題名（和文）運動の上達を促す神経基盤の解明

研究課題名（英文）Elucidating the neural basis of motor progress

研究代表者

門田 宏（Kadota, Hiroshi）

高知工科大学・情報学群・准教授

研究者番号：00415366

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトは運動学習を通して様々な運動技能を獲得し、日々の生活の中で適切な運動を行うことができる。本研究では、運動学習前の脳の状態と運動学習能力との関係を明らかにしていくことを目的とした。実験参加者の安静時脳活動（脳機能画像）および脳構造画像を撮像後、ジャグリング課題の運動学習を行わせた。そして脳画像と運動学習度合いについて相関解析および機械学習を行った。相関解析の結果、安静時脳活動と運動学習度合いには左感覚運動野と相関があることが明らかになった。そして機械学習の結果から脳画像から運動学習能力が予測できる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、運動学習前の脳画像を解析することで運動学習能力を推定できる可能性が示唆された。個人の運動学習能力が予測できるようになれば、リハビリテーションやスポーツトレーニングなどにおいて個人に合わせた効率的な運動学習につながる可能性が考えられる。

研究成果の概要（英文）：Humans can acquire various motor skills through motor learning, and able to perform appropriate movements in our daily lives. The purpose of this study was to clarify the relationship between the brain state before motor learning and motor learning ability. We recorded the resting-state brain activity (functional brain images) and structural brain images, and then the participants were asked to train juggling. We conducted correlation analysis and machine learning on the brain images and the degree of motor learning. Correlation analysis revealed that there was a correlation between resting-state brain activity and the degree of motor learning in the left sensorimotor area. The results of machine learning suggested that motor learning ability could be predicted from brain images.

研究分野：システム神経科学

キーワード：運動学習 fMRI

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々は運動学習を通して様々な運動技能を獲得し、日々の生活の中で状況に応じた合目的な運動を行うことができる。この合目的な運動を学習できる能力は生きていく上で欠かせない能力の一つである。そして、この運動学習能力には個人差があり、新しい運動技能を獲得するためにトレーニングを行うと、トレーニングによって速やかに運動技能が上達して短い期間で上手くなる人もいれば、同じようにトレーニングを行ってもなかなか上達しない人もいることが知られている。

このような運動学習能力の違いにおける神経基盤として、TMS (Transcranial Magnetic Stimulation) を用いて MEP (motor evoked potential) と運動学習能力の関係を調べた研究から運動野 (皮質脊髄路) の入出力特性の gain が高い人ほど運動の上達が早いことがわかってきた。また、実験参加者の安静時の脳活動を fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging) で計測し、その後、力場環境における到達運動を学習させる課題を行わせ、安静時脳活動と運動学習能力との相関を調べた研究では、安静時に後頭頂葉が強く活動している人ほど短時間で上達していることが報告されている。このように運動学習能力における神経基盤について運動野や後頭頂葉等の関わりが明らかとなってきた。

2. 研究の目的

本研究では、特に運動学習前の脳の状態と運動学習能力について研究を進めた。運動学習前に磁気共鳴画像法 (MRI) を用いて全脳を対象にして実験参加者の安静状態の脳活動や構造を計測しておき、その後、実験参加者に運動課題を行わせた。そして、運動学習前の実験参加者の脳の活動状態や構造と運動学習度合いとの関係を調べることで、運動学習前の脳の状態における運動学習能力に関わる神経基盤を明らかにしていくことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験参加者

運動学習課題として右手のみで 2 つのボールを内回りで投げるツーインワンハンドというジャグリング課題を用いた。まず、ジャグリングを今まで行ったことが無い右利き実験参加者を選定するために、アンケートを実施した。アンケートではこれまでの運動経験に関する質問および利き手の質問を行った。利き手は Edinburgh の利き手テストの判別指数を用いて判断した。アンケート回答者のうち右利きかつジャグリング未経験と回答した中から MRI および運動学習実験の実験参加者を募った。その結果、MRI および運動学習実験に 68 名 (男性 44 名、女性 24 名) が参加した。

(2) 実験手順

MRI を用いて実験参加者の安静時脳活動および脳構造の計測を行った。安静時脳活動の計測では実験参加者に十字の固視点を提示し、それを寝ないでリラックスした状態で見ているように教示した。そして、その時の安静時脳活動を約 10 分間計測した。計測中の実験参加者の状態については MRI 対応の EyeLink1000 を用いて実験参加者の目が開いていることを実験者が確認していた。また脳構造画像については T1 強調画像と拡散強調画像 (Diffusion Weighted Imaging: DWI) を計測した。

その後、実験参加者は別室に移動し、ツーインワンハンドのジャグリング課題を行った。課題実施前に実験者から口頭による説明および見本動画を 3 回提示した。実験参加者がボールを落とす、動きが止まるまたは片手で同時に 2 球保持するまでを 1 試行とし、全 250 試行を行った。また疲労等を避けるためジャグリング課題の開始から 10 分毎に 3 分間の休憩を設けた。課題中の様子はビデオで撮影し、連続成功回数を記録した。ビデオ画像と記録した回数を照らし合わせることで間違いが無いように確認を行った。

(3) 解析

MRI の安静時脳活動画像の解析においては、SPM (Statistical Parametric Mapping) 8 の toolbox である DPARSF A (Data Processing Assistant for Resting-State fMRI advanced edition) を用いて安静時脳活動における低周波数帯域の振動の活動指標である平均低周波振幅強度 (mean fractional Amplitude of Low Frequency Fluctuations: mfALFF) を算出した。mfALFF 画像は各 voxel の 0.01 ~ 0.1Hz 程度の低周波数領域の信号を全脳信号平均値で割った画像である。構造画像の解析には SPM12 を用い、T1 強調画像においては VBM (Voxel-Based Morphometry) の手法を用いて灰白質容積の解析を行った。拡散強調画像 (DWI) については白質線維の走行を推定した DTI (Diffusion Tensor Imaging) を求めた。図 1 にそれぞれの画像の例を示す。

またジャグリングにおける運動学習度合いの指標として総キャッチ数を算出した。ただし、1 名の実験参加者においてジャグリング課題の 248 試行までしか計測できていなかったため今回の解析では 248 試行で統一した。

そして MRI の脳画像とジャグリングの総キャッチ数の関係について相関解析と機械学習を用

いて検討した。相関解析では、SPM12 を用いて mfALFF、VBM、DTI それぞれの画像についてジャグリングの総キャッチ数との相関のある脳部位を検討した。また、機械学習では、mfALFF、VBM、DTI の脳画像からジャグリングの学習成績が予測できるか検証するために 3D-CNN (convolutional neural network) と 2D-CNN のモデルを用いた。3D-CNN のモデルとして VGG、ResNet、Cole-CNN、Fixed Filter、Down Scaling を用いた。2D-CNN のモデルとしては事前学習済みのモデルである ResNet50 を用いてファインチューニングを行った。脳画像は 3 次元データであるため、2D-CNN のモデルで機械学習を行うときは水平断面方向の 2 次元脳画像を作成し、それを用いた。さらに、複数の画像情報を用いることでモデルの正解率が上がる可能性が考えられたので、3 種類の画像を同時に用いた機械学習も行った。3D-CNN においては 3 種類の画像の同時入力、2S-CNN においては 3 種類の画像の合成画像 (図 1) を用いた。そして運動学習成績の予測については、ジャグリングの総キャッチ数に基づいて上位 34 名と下位 34 名に分類し、上位下位の 2 クラス分類を行った。入力データについてはホールドアウト法を採用し、トレーニングデータ 8 割とテストデータ 2 割にランダムに分類した。20 回の平均正解率を求めることでモデルを評価した。

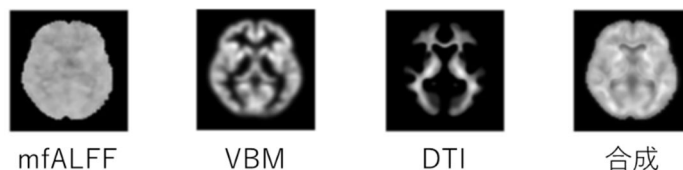


図 1 : mfALFF, VBM, DTI, 合成それぞれの画像の例

4. 研究成果

(1) 運動課題成績

ジャグリングの総キャッチ数は最小が 96 回、最大が 1417 回であり、平均総キャッチ数は 533 ± 311 回 (平均 \pm 標準偏差) であった。このことから実験参加者間でジャグリングの運動学習度合いが大きく異なっていることが示された。

(2) 相関解析

安静時脳活動 (mfALFF) については、相関解析の結果、左感覚運動野に有意な正の相関がみられた ($p < 0.001$ uncorrected at voxel level and $p < 0.05$ with family-wise error correction at cluster level)。つまりジャグリングの運動学習前の安静時における左感覚運動皮質がより活動している人はジャグリングの運動学習度合いが高かった。このことから安静時の左感覚運動野の活動から右手でのジャグリングのような運動の学習能力の予測ができる可能性が示唆された。

また、灰白質の構造画像 (VBM) については、ジャグリングの総キャッチ数と灰白質容積に有意な相関のある脳部位は認められなかった。白質の構造画像 (DTI) についても、ジャグリングの総キャッチ数との間に有意な相関のある脳部位は認められなかった。

(3) 機械学習

3D-CNN では VGG、ResNet、Cole-CNN、Fixed Filter、Down Scaling の全てのモデルで有意な正解率は得られなかった。本研究でのデータ数では、画像の次元に対してデータ数が少なかったため全てのモデルにおいて過学習がおきて適切な学習が行えず、その結果テスト時の正解率が悪かったと考えられる。

2D-CNN では全ての画像に対して有意な正解率が得られた (表 1)。そのなかでも特に VBM が最も正解率が高く、複数の画像の情報を持っている合成画像が最も正解率が高いわけではなかった。3D-CNN と違い 2D-CNN の ResNet50 は事前学習モデルが大量の画像を学習しており、そのため少ないデータ量でも適切な学習ができたと考えられる。また、相関解析では有意な相関がある脳部位は同定されなかった構造画像 (VBM および DTI) においても有意に高い正解率が得られたことから灰白質や白質においても右手でのジャグリングのような運動の学習能力の予測ができる脳構造が存在している可能性が示唆された。そして、相関と 2 クラス分類であるため評価指標の違いには留意する必要があるが、相関解析では有意な相関がみられず機械学習で有意に高い正解率が得られたことより、相関解析より CNN を用いた特徴量の抽出の方がより精度が高い可能性が示唆された。特に VBM において最も高い正答率が得られたことから、灰白質に運動学習能力の予測に関わる情報が多く含まれている可能性が示唆された。ただし、本研究では脳のどの場所の情報を用いて運動学習能力の推定が行われたかについては不明であるため今後の検討が必要であると考えられる。

表 1 : ResNet50 の正解率

Model	mfALFF画像	VBM画像	DTI画像	合成画像
ResNet50	82.7 ± 2.2	92.56 ± 2.6	77.6 ± 1.9	86.4 ± 2.9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sekiguchi Hirofumi, Yamanaka Kentaro, Takeuchi Shigeki, Futatsubashi Genki, Kadota Hiroshi, Miyazaki Makoto, Nakazawa Kimitaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Acquisition of novel ball-related skills associated with sports experience	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-91120-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 横田文, 門田宏, 関口浩文
2. 発表標題 脳構造画像を用いたジャグリング課題の個人差に関する検討
3. 学会等名 バイオメカニズム学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田文, 関口浩文, 門田宏
2. 発表標題 脳画像を用いたジャグリング課題の学習能力の予測に関する検討
3. 学会等名 四国体育・スポーツ学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田文, 門田宏
2. 発表標題 安静時脳活動とジャグリング課題の成績との関連性の検討
3. 学会等名 四国体育・スポーツ学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関口浩文, 佐々木睦, 二橋元紀, 門田宏
2. 発表標題 左右脳機能マップと両手協調運動によるスキル学習との関連性
3. 学会等名 日本臨床神経生理学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	関口 浩文 (Sekiguchi Hirofumi) (20392201)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------